

베인 회전각의 변화에 따른 디퓨저의 성능특성에 관한 실험적 연구

조성국* · 강신형**

Experimental Study on the Performance Characteristics of the Diffuser as a Relation of the Variation of Vane Turning Angle

Sung-Kook Cho*, Shin-Hyoung Kang**

Key Words: Vaned Diffuser (베인 디퓨저), Turning Angle (회전각)

ABSTRACT

Recently, impressive gains of performance and efficiency with apparently little or no loss in flow range have been seen with the use of LSVD(Low Solidity Vaned Diffuser) over vaneless diffuser. Experiments of the effects of the vane turning angle variations(positive, negative, zero), with the other design parameters fixed, on the performance and flow range were carried out. Diffusers with a zero turning angle have the best characteristics in terms of performance and efficiency and the FFT results show different frequency characteristics due to vane turning angles in low flow range.

1. 서론

원심압축기는 소형 가스터빈 엔진, 과급기, 냉동기, 화학처리 분야 등에서 다양하게 사용되고 있다. 최근에는 높은 효율을 가짐과 동시에 넓은 작동범위가 요구됨으로써 디퓨저에 대한 새로운 개념의 설계에 관심을 가지게 되었다. 따라서 최근에 산업용 원심압축기에서 낮은 설리디티의 베인 디퓨저(LSVD)의 사용이 증가되고 있다.

이는 압력회복의 증가, 효율의 상승뿐 아니라 기존의 베인 디퓨저에 비하여 작동범위의 증가 등 많은 장점을 보이고 있다. Senoo⁽¹⁾는 기존의 베인 디퓨저에서 목(throat)에 의해 유량이 제한되는 현상을 제거하면

작동범위가 넓어질 수 있을 것이라고 추측했다. 목은 이웃한 두 베인 간의 최소 면적으로 정의된다. 만약 베인이 적당한 코드 길이와 피치를 가진다면 진정한 의미에서의 디퓨저 목은 존재하지 않게 되고, 따라서 초크 마진이 증가하게 된다고 하였다. Senoo 등⁽²⁾은 원심 송풍기에 1열과 2열의 LSVD (Low Solidity Vane Diffuser)를 설치하여 베인의 설치각(stagger angle)과 반경비 등의 다양한 조합에 대한 결과에 대해 제시하였다. Osborne과 Sorokes⁽³⁾는 다양한 비속도와 작동유체에 대해 원심식과 사류식 임펠러의 단단 및 다단 압축기에 1열의 LSVD를 사용하여 높은 비속도에도 LSVD가 효율과 작동영역 면에서 우수하다는 것을 보여주었다. Sorokes와 Welchs⁽⁴⁾는 설리디티가 0.735인 회전 가능한 LSVD를 만들어서 설치각의 영향과 베인의 선단 반경비(1.08, 1.15)에 대한 영향을 연구한 바 있다.

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

본 연구에서는 지금까지 진행되지 않은 베인의 회전각(turning angle)을 변화시켜서 성능 및 효율에 미치는 영향과 작동영역 면에서의 영향, 저유량 영역에서의 주파수 특성 등에 대한 연구를 수행하였다. 여기서 베인의 회전각(ϕ)는 Fig. 2에 정의된 것과 같다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1에 시험용 압축기를 도시하였다. 디퓨저에서의 원주방향 불균일성을 없애기 위하여 벌루트 대신 4개의 배출관을 가지는 컬렉터를 사용하였다. 임펠러⁽⁵⁾ 입구에 설치된 이미 보정된 노즐을 이용하여 유량을 측정하였다. 압축기의 회전수는 마그네틱 픽업센서를 사용하여 측정하였다. 시험에 사용된 임펠러는 직경 120 mm이고, 17°의 후향각을 가지고 있으며 자세한 제원은 앞선 연구⁽⁵⁾에 제시되어 있다.

본 연구에 사용한 디퓨저는 낮은 설리디티의 디퓨저(LSVD)로서 그 주요 제원은 그림 2와 Table 1에 나타내었고, 측정점을 포함한 각각의 형상을 그림 3에 제시하였다.

Fig. 4에는 자료획득장치가 도시되어 있다.

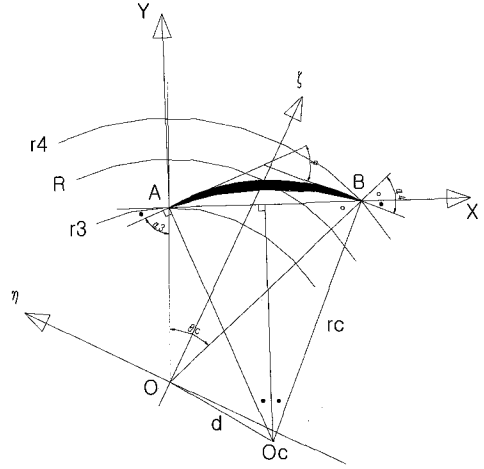


Fig. 2 geometry of vaned diffusers

Table 1 Parameters of vaned diffusers

vane	r_3/r_2	r_4/r_2	α_3	α_4	θ_c	ϕ
zero	1.1	1.4	60°	42.9°	17.1°	0
neg.	1.1	1.4	60°	35.5°	15.1°	-9.4°
pos.	1.1	1.4	60°	62.3°	24.6°	26.9°

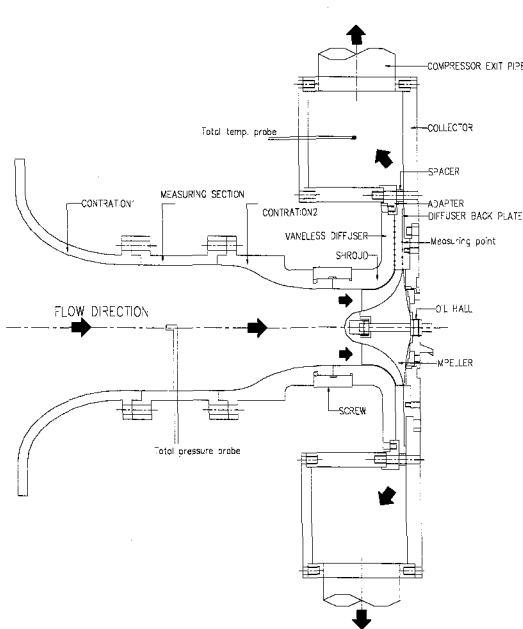


Fig. 1 Schematic diagram of the test sections

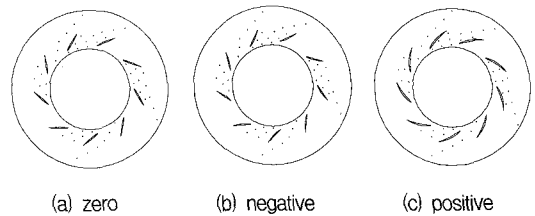


Fig. 3 Vaned diffusers with static taps

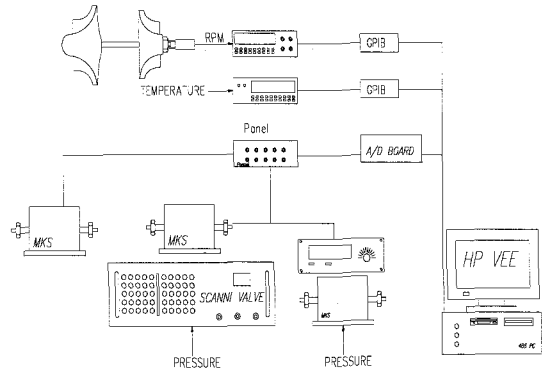


Fig. 4 Data acquisition system

노즐 입·출구의 차압과 디퓨저 벽정압, 대기압을 측정하기 위해 각각 저압용, 고압용 및 대기압용 센서(MKS Co.)를 사용하였다. 압력센서로부터 나온 아날로그 신호는 PC에 내장된 A/D 변환기(Data translation Co.)에 의해 디지털화 되어 PC에 저장되게 된다. 또한 T-형 열전대 및 마그네틱 픽업용 센서로부터 나온 신호는 다채널 기록계(Fluke Co.)와 회전수계(PM6665)를 통해 각각 디지털화 되어, GPIB 통신에 의해 PC로 전달된다. 저유량 영역에서의 불안정성과 스톨짐을 알아내기 위해 임펠러 전단 ($x/D=2$) 위치에 열선(hotwire)을 설치하였고, 스트레인 게이지 형(Sensotec co.) 압력센서를 디퓨저 출구($r/r_2=1.8$) 벽면에 부착하였다. 임펠러의 익단 간극은 성능시험에 앞서 임펠러만을 장착한 상태에서 시험회전수를 포함한 전 회전수 범위에서 근접센서(Bently Nevada Co. 3000 RAM probe)를 이용하여 임펠러의 동적변위를 측정된 결과를 근간으로 하여 임펠러 출구에서 축방향으로 0.3 mm, 임펠러 입구에서 반경방향으로 0.5 mm가 되도록 하였다.

2.2. 실험방법

본 연구에 사용된 임펠러의 설계 회전수⁽⁵⁾인 43,000 rpm을 포함하여, 36,000 rpm과 50,000 rpm에 대해 성능시험을 수행하였으며, 저유량 영역에서의 실험은 안전성을 고려하여 36,000 rpm에서 수행하였다. 각 회전수에서 고유량 영역으로부터 유량을 줄여가면서 성능평가를 수행하였으며, 성능평가를 수행한 후 스톨 지점을 포함한 저유량 영역에서의 성능을 적은 유량범위에서 자세히 측정하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1. 베인의 회전각이 성능과 작동범위에 미치는 영향

베인디퓨저의 설계변수 중에 베인의 입구각을 60° 로, 베인의 출구반경을 $r_4/r_2=1.4$ 로 고정시키고, 베인의 회전각 만을 3가지 형태로 하여 성능평가를 수행하였다. 따라서 설치각(stagger angle)도 변하게 되며, 베인의 출구 반경을 고정하였기 때문에 형상에 의해서 베인의 설리디티(피치길이/코드길이)도 변화하게 된다. 각각의 베인을 설치한 경우에 대한 성능을 비교하기 위해서 세가지 회전수에 대해 디퓨저 출구에서의 정압치와 등엔트로피 효율을 Fig. 5와 6에 도시하였다.

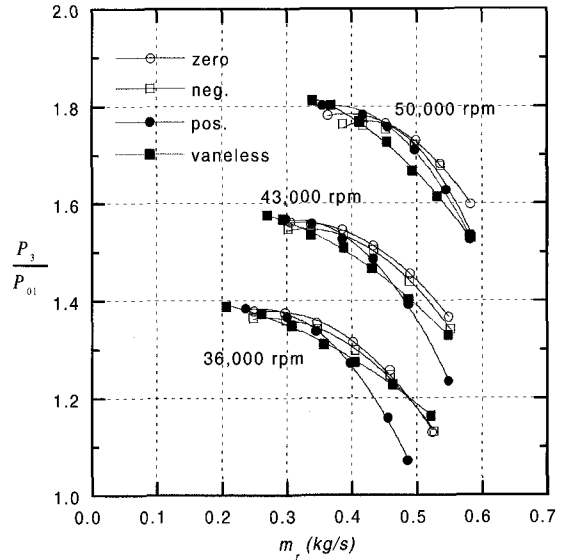


Fig. 5 Comparison of diffuser exit pressure ratio

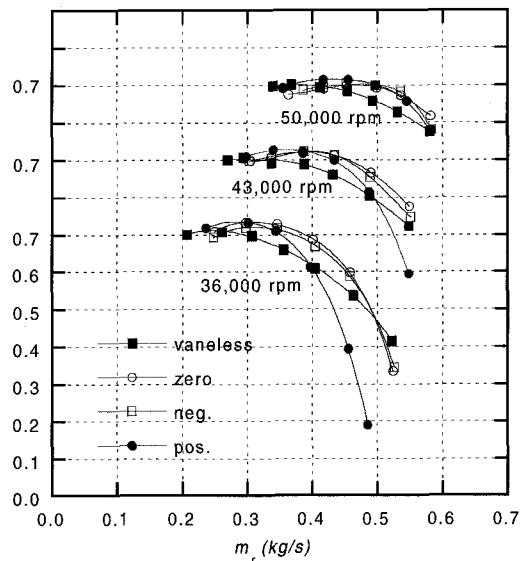


Fig. 6 Comparison of stage total to static efficiency

베인의 입사각에 의한 손실이 상대적으로 큰 고유량 영역과 저유량 영역을 제외한 대부분의 작동영역에서 베인이 있는 경우가 베인리스 디퓨저 보다 정압 상승률이 높게 예측되었다. 압축성 효과가 비교적 크지 않은 낮은 회전수에서는 동압 성분이 낮으므로 그 차이는 작게 예측되지만 회전수가 높아짐에 따라 커지게 된다. 베인의 회전각이 없는 zero vane의 경우가 전체적

으로 가장 우수한 정압 상승량을 보였다. Negative vane은 역방향으로 회전각을 주어 회전방향으로의 유동성분을 압력으로 회복시키려는 의도로 설계하였으나, 이에 의해 발생하는 과도한 역압력 구배에 의한 손실로 전체적인 성능이 zero vane의 경우보다 적게 예측된 것으로 생각된다. Negative vane의 경우는 회전각이 크기 때문에 고유량 영역에서 실제 폭은 존재하지 않지만 유로 단면적의 감소로 인하여 정압 상승량이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 정압 분포와 마찬가지로 효율도 또한 zero vane의 경우가 작동영역에서 가장 좋은 결과를 나타내었다.

베인이 있는 경우에 임펠러 출구에서의 압력분포는 임펠러와 디퓨저의 간섭효과에 의해 원주방향으로 균일한 값을 가지지 못한다. 따라서 동압을 계산하기 위해서 베인리스 디퓨저에서 측정된 정압치를 이용하여 전압을 계산한 결과를 기준으로 하여 각각의 베인에 이 값을 적용시켰다.⁽⁴⁾ 이러한 계산을 통해 얻어진 결과를 Fig. 7에 제시하였다.

전체 압축기의 성과와 마찬가지로 zero vane의 경우가 전유량 범위에서 가장 우수한 경향을 보였다. Positive vane의 경우는 유동각이 큰, 적은 유량영역에서 정압 상승량이 크게 예측되었다. 설계단계에서는 역방향으로의 회전각이 원주방향 유속을 최대한 감소 시킴으로써 정압 상승량이 크게 되리라는 기대를 하였으나, 과도한 역압력 구배에 의한 손실이 증가됨으로써 정압 상승량이 작게 예측됨을 알 수 있었다.

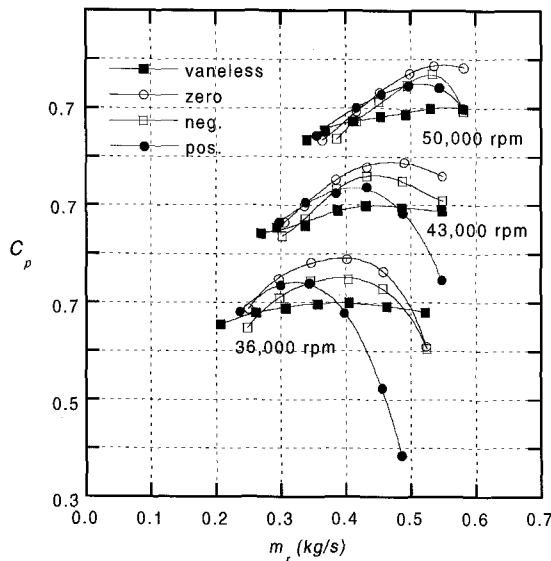
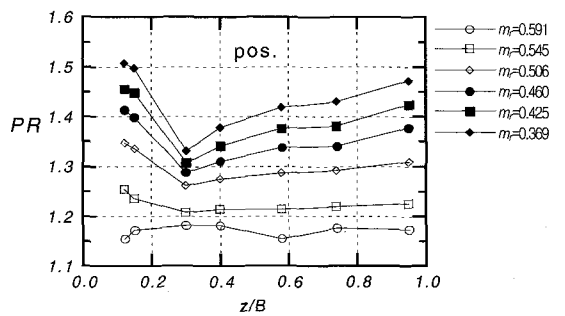


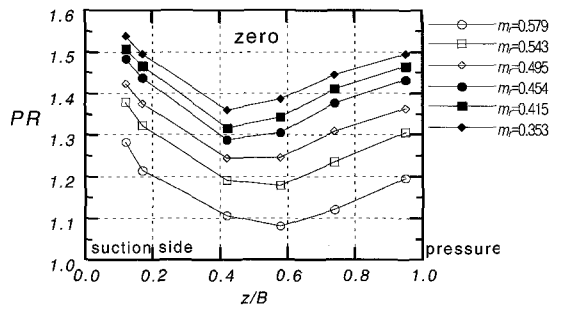
Fig. 7 Comparison of diffuser pressure recovery ($r/r_2=1.88$)

3.2. 임펠러 출구에서의 압력분포

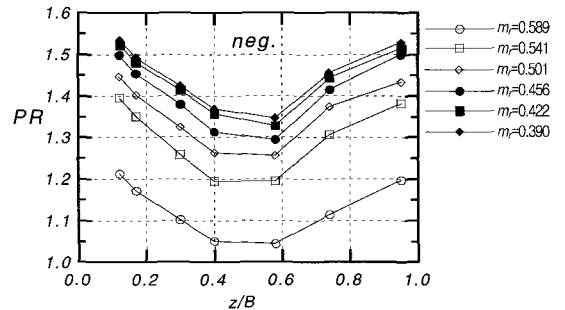
임펠러 출구에서의 압력분포는 베인이 설치되어 있기 때문에 원주방향으로 균일한 분포를 가지지 못하게 된다. 베인에 따른 영향을 살펴보기 위해서 임펠러 출구 슈라우드 부분에 6개의 정압홀을 내어 유량 및 회전수 별로 압력을 측정하였다. 그림에서 압력면과 흡입면은 디퓨저를 기준으로 한 것으로 디퓨저 베인의 연장선을 각각 압력면과 흡입면의 시작점으로 정의하였으며, 정압 값은 Sampling rate는 10 kHz로 10초동안 십만개의 데이터를 평균한 것으로 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.



(a) positive turning angle



(b) zero turning angle



(c) negative turning angle

Fig. 8 Comparison of pressure distribution at impeller exit ($r/r_2=1.0$, 50,000 rpm)

임펠러 출구에서의 압력분포와 압력면과 흡입면에서의 압력 값이 베인의 회전각에 의해서도 많은 영향을 보임을 알 수 있었다. 베인의 회전각이 양에서 음으로 바뀔 때 따라 최저 압력점이 흡입면에서 압력면으로 이동하는 것을 알 수 있었으며, 유량이 감소할수록 압력면과 흡입면에서의 압력이 유로 중앙의 압력보다 높게 측정되었다.

3.3. 디퓨저 내에서의 압력분포

유량과 회전수의 변화에 따른 디퓨저 내부에서의 압력값을 측정하기 위해 압력면과 흡입면 사이에 5지점, 반경방향으로 베인이 시작하는 지점에서 ($r_3/r_2=1.1$) 부터 끝나는 지점($r_4/r_2=1.4$) 까지 5지점으로 총 25지점에서 정압값을 측정하였다. Fig. 9에는 zero vane의 디퓨저에 대해 36,000 rpm에서 유량의 변화에 따른 디퓨저 내의 압력분포를 도시하였다. 왼쪽은 흡입면을 오른쪽은 압력면을 나타낸다. 고유량에서 저유량으로 유량이 줄어들 때 따라 유동각은 반경방향에서 접선방향으로 변하게 된다. 유동각도가 변함에 따라 디퓨저 입구에서 양의 각에서 음의 각으로의 입사각의 변화를 겪게 된다. 본 실험에 사용된 디퓨저는 노즐목이 존재하지 않는 낮은 설리디티의 디퓨저이기 때문에 일반적인 베인 디퓨저에서 관찰되는 목 근처에서의 심한 압력변화는 측정되지 않았다.

설계유량에서는 유동각과 베인각이 거의 일치하므로 같은 반경비에서 흡입면보다 압력면에서 압력이 높게 측정되었고, 고유량 영역에서는 원주방향에 대해 유동각이 상대적으로 크기 때문에 흡입면으로 상대적으로 많은 양의 유동이 흐르게 된다. 따라서 흡입면에서의 벽면효과가 크게 나타나 압력면과 흡입면의 압력차가 작게 되고, 고유량에서는 디퓨저는 본래의 역할을 못하게 된다. 저유량으로 갈수록 유동각에 의한 영향으로 흡입면에서 압력면으로 압력이 증가함을 알 수 있다. 그리고 베인이 끝나는 지점에서는 흡입면에서 압력면까지 원주방향으로 균일한 압력값을 나타내었다.

3.4. 탈 설계점에서의 유동현상 비교

원심압축기의 특성 중의 하나는 저유량 영역에서 상대적으로 효율이 높다는 것이다. 이런 이유로 스톨 및 서지영역에서의 작동 안정성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 스톨의 시작점을 전후

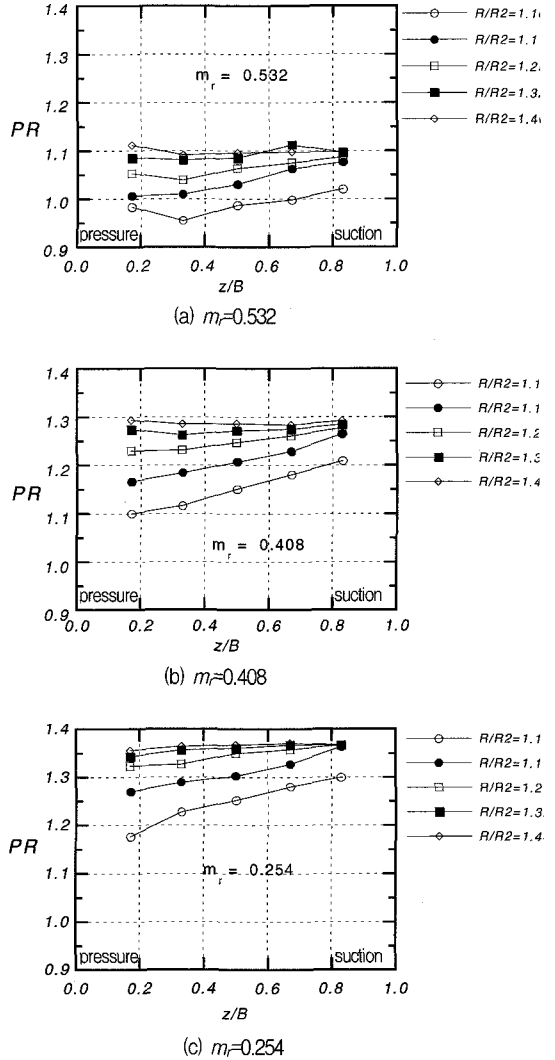


Fig. 9 Pressure distribution in diffuser passage (zero, 36,000 rpm)

해서 베인의 회전각도가 압축기의 불안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해서 회전차의 입구($x/D=2$)에 열선을 설치하고, 디퓨저 출구($r/r_2=1.8$)에 압력센서를 설치하였다. 안정성 등의 이유로 측정은 36,000 rpm에서 행하였다. 실험 결과의 분석을 위해 열선과 압력센서로부터 측정된 결과를 auto-correlation과 cross-correlation, FFT방법을 적용시켰다. 그 방법을 간단히 기술하면 다음과 같다.

신호 $x(t) = x(n\Delta t)$, $n=1, 2, \dots, N$ 을 고려 할 때, $n\Delta t$ 만큼 지연된 시간에 cross-correlation함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n y_{n+r} \quad r=0, 1, 2, \dots, m$$

위 식은 ±1사이의 값을 가지도록 normalized 될 수 있다. 그 식은 아래와 같다.

$$\rho(r\Delta t) = \frac{R(r\Delta t)}{\sqrt{R(0)}\sqrt{R(0)}} \quad r=0, 1, 2, \dots, m$$

Auto-correlation은 cross-correlation의 특수한 경우로서 y_{n+r} 를 x_{n+r} 로 바꾸면 된다. Fig. 10은 베인리스 디퓨저에 대해 전 유량범위에서 I-형 열선으로 측정된 데이터를 나타낸다.

스톨이 시작되는 지점($m_r=0.165$)에서 전압신호는 안정된 영역에 비해 심한 요동을 하게 된다. 그림으로 나타내지 않았지만 베인리스 디퓨저의 경우가 가장 작은 유량에서 스톨이 감지되었으며, 베인 디퓨저의 경우, 유량을 줄여갈 때, negative, positive, zero, vane의 순서로 스톨이 감지되었다. 스톨 주파수의 정량적인 값을 얻기 위하여 이들 신호를 FFT처리를 하였으며, 주기 및 지연시간 등을 구하기 위해서 auto-correlation과 cross-correlation을 수행하였다.

Fig. 11은 각각의 디퓨저에 대하여 스톨이 시작하는 유량에서 열선과 디퓨저 출구의 전압신호를 이용하여 계산한 cross-correlation의 결과를 나타내고, Fig. 12는 스톨이 시작하는 유량에서의 열선 신호에 대한 FFT결과를 나타낸다.

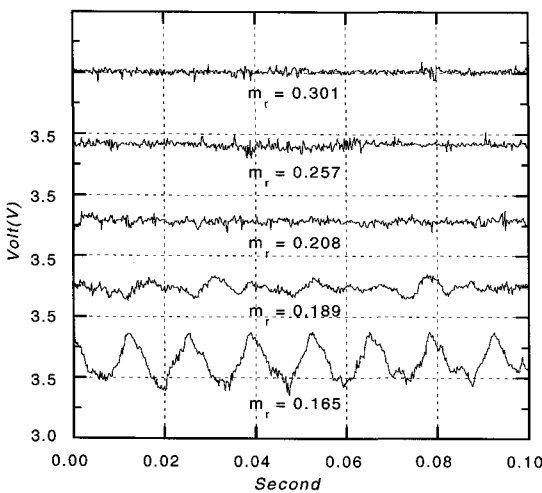


Fig. 10 Hotwire signal at impeller inlet (vaneless)

첫 번째 피크치까지를 두 지점간의 시간 지연량이라고 할 수 있는데, 주기가 크면 시간지연도 커지는 결과를 얻을 수 있었다. 베인리스 디퓨저가 가장 낮은 주파수를 가지는 것을 알 수 있었으며, 베인에 따라서도 주파수 특성이 다르게 나타났는데 역압력구배가 가장 강하게 일어날 수 있는 negative vane의 경우가 가장 높은 주파수 특성을 가졌다. 결과에서 알 수 있듯이 베인의 설치에 의해서 로터-스테이터 간의 간섭에 의하여 주파수 특성이 높게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 베인의 회전각 즉, 압력구배에 의해서도 주파수 특성이 다르게 발생함을 알 수 있었다.

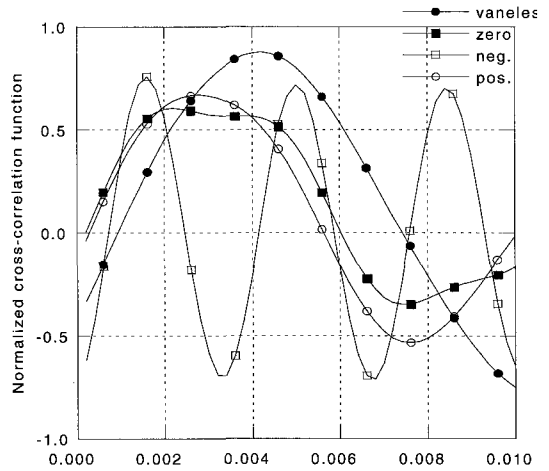


Fig. 11 Cross-correlation functions (impeller inlet & diffuser outlet, 36000 rpm)

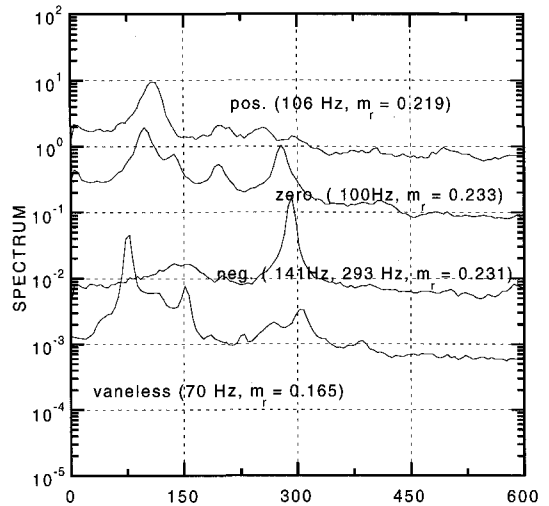


Fig. 12 Comparison of frequency spectrum with hotwire signal at impeller (36,000 rpm)

앞으로 임펠러의 입구, 출구 및 베인의 여러 지점에서 비정상 압력신호를 얻어 이들 결과에 대한 연구를 통하여 스톨 및 서지현상에 대한 보다 많은 연구가 진행될 예정이다.

4. 결 론

최근에 세계적으로 연구되어지고 있는 낮은 설리디티의 디퓨저(LSVD)를 세가지 형태로 설계·제작하고 성능시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 베인리스 디퓨저 보다 성능 및 효율면에서 낮은 설리디티의 베인 디퓨저가 우수하며, 작동영역 면에서도 상당히 넓은 영역에서 운전이 가능하였다. 본 연구에서는 압축성 효과가 그리 크지 않아 동압성분이 상대적으로 작은 조건에서 실험한 결과 이므로 디퓨저 간의 효율차이가 작아 보이나 좀더 마하수가 큰 영역에서는 낮은 설리디티의 디퓨저가 우수할 것으로 생각된다. 그러나 과도하게 회전각을 주게 되면, 실제 노즐 목은 존재하지 않지만 고유량 영역에서 디퓨저로서의 역할을 제대로 하지 못하는 것으로 나타났다.
- (2) 디퓨저 베인에 의해 임펠러 출구의 정압은 균일한 분포를 가지지 않았으며, 베인의 회전각에 따라 최소압력지점이 이동함을 실험을 통하여 관찰할 수 있었다. 이것이 로터와 스테이터 간의 간섭을 유발하고, 따라서 비정상상에 의한 손실항이 설계시 반영되어야 한다고 생각된다.
- (3) 디퓨저 베인 내부에서의 압력분포는 유량의 변화에 의해 압력면과 흡입면을 따라 변화를 가졌으며, 베인의 회전각에 따라 디퓨저의 압력분포의 변화를 관찰할 수 있었고, 스톨의 시작을 유발하는 하나의 원인으로 간주될 수 있음을 알 수 있었다.

- (4) 베인의 회전각에 따라 스톨점의 위치가 달라짐을 확인할 수 있었고, 주파수 특성도 다르게 관찰되었다.

앞으로 실험을 통하여 각 부의 비정상 압력신호를 얻음으로써 스톨과 서지를 유발시키는 현상과 원인에 대해 연구가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 서울대 터보동력기계 연구센터와 한국과학기술 정책 관리연구소의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 관계자 여러분에게 심심한 감사를 포함합니다.

참고문헌

- (1) Senoo, Y., 1981, "Low Solidity Circular Cascade for Wide Flow Range Blower," Proceedings of Advanced Concepts in Turbomachinery, Fluid Dynamics Institute, Hanover, New Hampshire.
- (2) Senoo, Y. and Hayama, H., 1983, "Low Solidity Tandem Cascade Diffusers For Wide Flow Range Centrifugal Blowers," ASME-Paper 83-GT-3, 1983.
- (3) Osborne, C. and Sorokes, J., 1988 "The Application of Low Solidity Diffusers in Centrifugal Compressors," ASME Winter Annual Meeting 1988, FED Symposium, Chicago.
- (4) Sorokes, J. M. and Welch, J. P., 1992, "Experimental Results on a Rotatable Low Solidity Vaned Diffuser," ASME Paper, 92-GT-19.
- (5) 조성국, 강신형, 1998, "소형 원심압축기의 성능평가에 대한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제22권 제8호, pp. 1052~1063.